

Capítulo 28 Em Síntese

Opções de restauração para a Amazônia



Barcarena. Para: bacia de rejeitos da Alunorte, controlada pela Norsk Hydro (Foto Pedrosa Nero/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Opções de restauração para a Amazônia

Jos Barlow^{a,*}, Plinio Sist^{b,c,*}, Rafael Almeida^d, Caroline C. Arantes^e, Erika Berenguer^{a,f}, Patrick Caron^c, Francisco Cuesta^g, Carolina R. C. Doria^h, Joice Ferreiraⁱ, Alexander Flecker^c, Sebastian Heilpern^j, Michelle Kalamandeen^k, Alexander C. Lees^l, Nathália Nascimento^m, Marielos Peña-Clarosⁿ, Camille Piponiot^o, Paulo Santos Pompeu^p, Carlos Souza^q, Judson F. Valentim^r

Mensagens Principais e Recomendações

- 1) A restauração abrange uma ampla série de objetivos relacionados à prática para recuperar a biodiversidade e as funções e serviços ecossistêmicos, tais como qualidade da água, sequestro de carbono e meios de subsistência das populações. A restauração também abrange os ecossistemas aquáticos e terrestres, indo além dos ecossistemas naturais para incluir a recuperação de atividades econômicas socialmente justas nas áreas desmatadas.
- 2) Nos sistemas terrestres, as opções de restauração locais incluem aceleração da recuperação após exploração de minérios, reflorestamento de vastos trechos de área desmatada, facilitação da recuperação de florestas primárias destruídas e restauração de atividades econômicas sustentáveis nas áreas desmatadas via intensificação sustentável, agrossilvicultura ou melhoria de sistemas de pousio na agricultura.
- 3) A restauração de sistemas aquáticos exige a aplicação de técnicas para regenerar habitats aquáticos e terrestres poluídos, inclusive aqueles afetados pela exploração de minérios e petróleo e plásticos; desenvolver e aplicar regras para reinstalação de regimes de fluxos naturais; remover barreiras que fragmentam rios e prejudicam a conectividade, e implementar parcerias colaborativas para recuperação dos habitats de peixes e planícies inundadas.
- 4) O alto custo e a complexidade de muitas opções de restauração significam que elas só devem ser usadas como último recurso; para várias áreas da Amazônia, o principal propósito deve ser evitar a necessidade da restauração através da conservação das florestas e corpos d'água.

Resumo Este capítulo analisa oportunidades e abordagens locais específicas para restauração de siste-

^a Lancaster Environment Centre, Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK, jos.barlow@lancaster.ac.uk

^b Agricultural Research Centre for International Development – France. CIRAD, sist@cirad.fr

^c Université de Montpellier, UR Forests & Societies, Montpellier 34398, France.

^d Department of Ecology and Evolutionary Biology, Cornell University, E145 Corson Hall, Ithaca NY 14853, USA

^e Division of Forestry and Natural Resources, 325G Percival Hall, 1145 Evansdale Drive, West Virginia University, Morgantown, WV 26506.

^f Environmental Change Institute, Oxford University Centre for the Environment, University of Oxford, South Parks Road, Oxford OX1 3QY, UK

^g Grupo de Investigación en Biodiversidad, Medio Ambiente y Salud (BIOMAS), Universidad de Las Américas (UDLA), De Los Colimes esq, Quito 170513, Ecuador

^h Laboratório de Ictiologia e Pesca, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Av. Pres. Dutra 2965, Olaria, Porto Velho RO 76801-058, Brazil

ⁱ Embrapa Amazonia Oriental, Trav. Dr. Enéas Pinheiro, s/nº, Bairro Marco, Belém PA 66095-903, Brazil

^j Department of Natural Resources, Cornell University, 226 Mann Drive, Ithaca NY 14853, USA

^k School of Geography, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

^l Department of Natural Sciences, Manchester Metropolitan University, All Saints Building, Manchester M15 6BH, UK

^m Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Instituto de Estudos Climáticos, Vitória, Espírito Santo, Brazil.

ⁿ Department of Environmental Sciences, Wageningen University & Research, PO Box 47, 6700AA Wageningen, The Netherlands

^o Smithsonian Conservation Biology Institute & Smithsonian Tropical Research Institute, 3001 Connecticut Avenue NW, Washington DC 20008, USA

^p Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, Aqueanta Sol, Lavras MG 37200-900, Brazil

^q Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), Trav. Dom Romualdo de Seixas 1698, Edifício Zion Business 11th Floor, Bairro Umarizal, Belém PA 66055-200, Brazil

^r Agroforestry Research Center of Acre, Embrapa Acre, Rodovia BR-364, Km 14 (Rio Branco/Porto Velho), Rio Branco AC 69900-970, Brazil

mas terrestres e aquáticos, focando em ações e benefícios locais. Considerações sobre paisagens e bioma são apresentadas no Capítulo 29.

Introdução Mudanças causadas pelo homem nas paisagens amazônicas têm afetado a biodiversidade e processos ecológicos, o que por sua vez, exerce impactos diretos e indiretos sobre o bem-estar humano. Embora grande parte do foco na Amazônia deva estar sobre a prevenção de mais perdas e destruição florestal (veja o Capítulo 27), existe uma crescente conscientização sobre a importância de ações restaurativas que visam reverter esse processo. A restauração poderia ser um componente fundamental de soluções baseadas na natureza que abordem desafios críticos à sociedade¹, incluindo a proteção e gestão sustentável dos ecossistemas aquáticos e terrestres, sejam naturais, artificiais ou uma combinação de ambos².

Definições e propósitos da restauração Antes de examinar o papel da restauração, é preciso definir esse termo nos ecossistemas aquáticos e terrestres. O termo restauração é usado genericamente para abordar um amplo conjunto de objetivos relacionados à prática de recuperação da biodiversidade e das funções e serviços ecossistêmicos, tais como qualidade da água, sequestro de carbono e/ou meios de subsistência das populações³. Dessa forma, nosso conceito de restauração inclui termos específicos como reabilitação, remediação e recuperação. Crucialmente, a restauração também inclui a recuperação de atividades econômicas sustentáveis e socialmente justas nas áreas desmatadas. Em muitos casos, as ações exigirão evitar um maior dano ambiental, bem como estimular sua recuperação.

Ações de restauração podem ser ativas (com interferência humana) ou passivas (naturais). Especificamos qual abordagem é necessária quando pertinente para cada resultado, mas reconhecemos que essa questão é, muitas vezes, um continuum. Mesmo a restauração passiva de florestas secundárias ou degradadas pode demandar tomada de decisões e intervenções (ex.: controle de queimadas, vedação). Finalmente, considerações espaciais não

são feitas aqui; o planejamento estratégico das opções de restauração na Bacia Amazônica e dentro das paisagens e bacias hidrográficas são abordadas no Capítulo 29.

Opções de restauração terrestre

Restauração após completa remoção do solo A extração mineral e de hidrocarbonetos remove ou altera os solos, perturba os ciclos de nutrientes e inibe seriamente a recuperação florestal ao destruir o banco de sementes dos solos e sua biota⁴⁻⁶. Outros efeitos secundários, como erosão do solo e poluição em águas subterrâneas e na superfície através da contaminação de mercúrio (Hg) e/ou drenagem de ácidos de minas, podem ser detectados a centenas de quilômetros dos locais de mineração^{7,8}. O nível de degradação a partir da extração de hidrocarbonetos significa que uma recuperação completa é altamente improvável e que as taxas de recuperação são baixas ou foram completamente paralisadas⁵. Como resultado, é crucial focar na recuperação de processos funcionais (produção primária, fluxos de energia e ciclos de nutrientes) e ecológicos (composição de espécies, mecanismos de dispersão, linhagens evolucionárias distintas) através da restauração ativa⁹⁻¹². As técnicas de restauração ativa de áreas poluídas incluem melhorar as condições do solo replantando espécies de árvores leguminosas¹³ ou inoculando os solos com microrganismos degradadores¹³.

Muitos países amazônicos têm desenvolvido processos sistemáticos para restauração pós-exploração mineral que incluem aterrar novamente áreas de exploração de minérios com substratos, e tratar e aterrar bacias de rejeitos como parte de estratégias “o mais perto que conseguir”. Para minas maiores, a execução legal da restauração após o fechamento das minas está, muitas vezes, vinculada a salvaguardas sociais e ambientais de grandes instituições financeiras multilaterais. Entretanto, existe uma ausência de monitoramento e cumprimento de políticas de mineração, sendo geralmente fracas ou inexistentes para operações de média a pequena escala. Adicionalmente, não existem esquemas de restauração de áreas impactadas pela exploração mineral ilegal.

Restauração da vegetação em áreas desmatadas A perda de pelo menos 867.675 km² das florestas primárias no bioma Amazônia até o momento significa que existem muitas oportunidades para restauração florestal. A maioria das florestas secundárias amazônicas resultantes da restauração passiva tem menos de 20 anos¹⁴. Dentro da Amazônia brasileira, a idade média é de apenas sete anos e florestas muito jovens (≤ 5 anos) representam quase que a metade do total das florestas secundárias¹⁵. O crescimento e a condição ecológica dessas florestas secundárias podem ser melhorados por meio da restauração ativa. Em alguns casos, a vedação pode ser importante para protegê-las da atividade pecuária^{16,17}, mas excluir queimadas é uma prioridade chave: Florestas secundárias podem ser mais inflamáveis do que as florestas primárias, pois são mais secas e quentes durante o dia¹⁸, e após serem queimadas se recuperam a um ritmo muito mais lento¹⁹. O valor das florestas secundárias também pode ser aumentado protegendo as florestas primárias existentes, pois isso promoverá a colonização das espécies, podendo aumentar o valor das florestas secundárias para biodiversidade²⁰ e estoques de carbono¹⁹. Ainda assim, continua sendo desafiador proteger as florestas secundárias de perturbações e do desmatamento; com frequência, essas florestas se encontram em paisagens fortemente desmatadas e são consideradas de pouco valor, o que pode ser uma das causas principais para seu desmatamento na década passada²¹.

Com respeito à restauração ativa, há uma variedade de abordagens, mas uma das mais populares envolve o plantio de mudas de diferentes espécies²². A configuração espacial da restauração ativa tem importância; árvores enfermeiras podem estimular a dispersão de sementes para as áreas de restauração; e a nucleação aplicada (quando o plantio em pequenos trechos estimula a recuperação florestal em maiores escalas) tem se provado um sucesso em outras partes dos Neotrópicos^{23,24}.

Restauração de florestas degradadas Estima-se que 17% das florestas amazônicas foram afetadas por distúrbios como extração de madeira, desmatamentos ou derrubadas pelo vento entre 1995 e 2017²⁵.

Crucialmente, durante esse período, 14% dessas florestas acabaram por ser desmatadas. Das florestas degradadas 29% foram degradadas novamente²⁵, destacando a importância de se proteger essas florestas e permitir que elas se recuperem. A enorme escala espacial e complexidade da degradação florestal na Amazônia significa que as estratégias mais locais e eficazes em termo de custo devem focar em prevenir que eventos de perturbação ocorram uma primeira vez ou que voltem a ocorrer. A complexa série de causas humanas de perturbações significa que isso envolve uma ampla série de estratégias. Uma parte da degradação pode ser evitada com a redução do próprio desmatamento. A prevenção de queimadas envolverá a redução ou o controle de focos de incêndio na paisagem, como aqueles usados no processo de desmatamento, e a vinculação da detecção inicial desses focos com o rápido envio de brigadas de incêndio²⁶. Também é crucial evitar a extração de madeira ilegal e convencional, embora isso permaneça um enorme desafio em toda a Amazônia²⁷. Outras iniciativas devem tentar evitar a repetição de distúrbios, pois seus impactos combinados podem exacerbar a mudança ecológica e limitar a recuperação.

Restauração de atividades econômicas sustentáveis em áreas desmatadas Soluções inovadoras para restauração de agroecossistemas e a produção sustentável de alimentos, fibras e outros bioprodutos em áreas desmatadas são essenciais para a reconciliação dos objetivos ambientais com o desenvolvimento econômico inclusivo e igualitário, especialmente no nível local. A necessidade de atividades econômicas sustentáveis e socialmente justas é maior onde a agricultura deixou de ser ou ainda não é lucrativa. Apresentamos, a seguir, três abordagens amplas para aumento da produtividade.

(i) A intensificação sustentável, isto é, aumentar a produtividade da terra, mão de obra ou do capital ao mesmo tempo em que se reduz os impactos ambientais, tem particular potencial em pastagens, desde que sistemas eficazes de governança sejam capazes de evitar maior conversão de terras e garantir o desenvolvimento sustentável²⁸. Segundo Stras-

sburg et al²⁹, aumentar a produtividade das pastagens na Amazônia brasileira para apenas 49-52% de seu potencial seria suficiente para satisfazer a demanda de alimentos, madeira e biocombustíveis até 2040, sem a necessidade de converter áreas adicionais de vegetação nativa. Isso resultaria na mitigação de cerca de 14,3 GT CO₂ e de desmatamento evitado. Entre as soluções tecnológicas para intensificação sustentável das pastagens estão a mudança de um sistema contínuo para um sistema de rotação³⁰, adotar pastagens combinadas para gramíneas-legumes^{31,32}, e utilizar sistemas de silvopastoris que integram árvores e diferentes agroecossistemas³³⁻³⁶.

(ii) A agrossilvicultura é outra opção para regenerar áreas improdutivas e manter a produção em áreas já desmatadas, sendo especialmente bem adaptada para pequenos proprietários. Os sistemas de agrossilvicultura integram árvores e culturas no mesmo terreno e conseguem sequestrar carbono em solos e vegetação como um co-beneficiário³⁷. Esses sistemas contribuem para mais de um terço das iniciativas de restauração na Amazônia brasileira³⁸, incluem muitas espécies nativas e proporcionam benefícios além da área sendo plantada, como o aumento da permeabilidade da paisagem para o biota florestal ou a mediação das temperaturas da paisagem.

(iii) O aprimoramento de sistemas de pousio na agricultura tem um grande potencial para a restauração econômica sustentável na Amazônia, à medida que a rotação de culturas é um pilar dos sistemas tradicionais de agricultura e comum através da bacia. Opções de gestão nos sistemas de pousio na agricultura incluem a redução do uso de queimadas com a adoção de técnicas como cortar-e-cobrir³⁹⁻⁴¹, encurtando os períodos de cultivo, e aumentando o período de pousio para restaurar a produtividade agrícola e do solo^{42,43}. Períodos de pousio estendidos possuem benefícios adicionais e podem ajudar a proteger a biodiversidade, facilitar a conectividade e melhorar os serviços dos ecossistemas, tais como suas funções hidrológicas.

Qualquer que seja a abordagem adotada ou incentivada, é importante que a restauração nas atividades econômicas aumente a complexidade e diversidade biológica ao invés de promover a uniformidade e especialização como forma de controlar a natureza e otimizar lucros^{44,45}. As abordagens devem reconhecer especificidades do contexto e utilizar tecnologias adaptadas ao local, inovações e caminhos de transformação a fim de tratar as múltiplas funções da agricultura, florestas e atividades. A restauração da área agricultável na Amazônia exige um grande investimento no design da atividade agrícola, utilizando-se ferramentas para mapear a adequação da área⁴⁶, e planos para uso da terra comunal⁴⁷. Apesar de progressos no conhecimento e nas políticas⁴⁸, as atividades econômicas sustentáveis e socialmente justas ainda precisam ultrapassar barreiras para adoções em larga escala^{35,49}.

Opções de restauração aquática

Restauração após poluição Poluentes que degradam os ecossistemas podem vir de muitas fontes e se dispersarem amplamente através das paisagens terrestres e de rios. Embora controlar poluição de fontes pontuais seja tecnicamente viável, existem desafios relacionados à economia, pouca governança e ausência de políticas adequadas. Ainda mais complexo é abordar fontes não pontuais, o que em muitos casos, exige integrar a restauração através de vastas áreas, incluindo habitats terrestres e aquáticos⁵⁰. Ao contrário da remediação da poluição de fontes pontuais, restaurar bacias degradadas por fontes não pontuais é considerado mais difícil e em muitos casos exige a restauração de vastas áreas de habitats terrestres.

Entre as fontes de poluição nos corpos d'água da Amazônia encontramos poluição da indústria, agricultura, esgoto, mercúrio e outros metais pesados provenientes da exploração de minérios, além de derramamento de óleo. A poluição da extração de petróleo e de minérios tem recebido considerável atenção, pois é generalizada, pode ser especialmente danosa a ecossistemas e é difícil de ser tratada, além de afetar muitas pessoas que dependem

diretamente da água dos rios para beber e se banhar, e dos peixes para consumo. Em termos de restauração direta da água, o uso de cal apagada para remover partículas suspensas parece ser um processo eficaz e não oneroso para que garimpeiros possam evitar o metil mercúrio em bacias de decantação quando combinado com a rápida drenagem das águas das minas⁵¹.

O plástico afeta cada vez mais os ecossistemas aquáticos da Amazônia, as cadeias alimentares⁵²⁻⁵⁴, e a saúde humana⁵⁵. Atualmente, o Amazonas está entre os rios mais contaminados por plástico no mundo⁵⁶. Grandes volumes de micro plásticos têm sido detectados nos sedimentos dos rios ao redor da cidade de Manaus. Concentrações especialmente altas de micro plásticos foram encontradas em partes de rios de vazão mais lenta onde sedimentos são depositados, tais como as partes rasas do baixo Rio Negro⁵⁷. Reduzir a poluição por plásticos é um enorme desafio global⁵⁸; algumas nações amazônicas, inclusive a Colômbia, Equador e Peru, estão começando a desenvolver regras para regulamentar o uso e o descarte de plásticos⁵⁹ e o Peru criou leis para uma eliminação progressiva das sacolas de plástico descartáveis⁶⁰.

Retirada de barragens e restauração dos ciclos de vazão natural e conectividade Na América do Sul, as tentativas de minimizar os impactos das hidrelétricas na conectividade dos rios geralmente são ineficazes⁶¹⁻⁶³. A retirada de barragens é uma alternativa e pode reverter alguns de seus efeitos ambientais^{64,65}. Justificar essa retirada depende do contexto no qual a barragem foi construída⁶⁶, e várias estruturas para priorização da retirada têm sido propostas nos últimos anos^{67,68}. Essas estruturas geralmente envolvem a comparação do volume de energia produzido em relação a vários objetivos ambientais (ex.: conectividade). Um exemplo de uma barragem que se qualificaria como prioridade para retirada é a Hidrelétrica de Balbina (Brasil). Balbina fornece apenas 10% da eletricidade consumida por Manaus (uma metrópole com 1,8 milhões de habitantes), mas criou um reservatório de mais de 2.300 km² e contribuiu para o desalojamento e massacre do povo Indígena Waimiri Atroari⁶⁹. Adicionalmente,

retirar uma fração das muitas pequenas usinas em bacias como Xingu poderia restaurar a conectividade, melhorar a qualidade da água e beneficiar a biodiversidade, sem incorrer em grandes custos sociais (ex.: reduzir a disponibilidade da água).

Restauração da atividade pesqueira e restrição à pesca predatória Os peixes são o alimento de milhões de pessoas na Amazônia, desde os povos Indígenas até a população urbana, sendo sua fonte primária de proteína, omega-3s, e outros nutrientes essenciais^{70,71}. Restaurar a atividade pesqueira envolve, em parte, abordar a questão da pesca predatória através do desenvolvimento e aplicação de regulamentações e práticas sustentáveis de pesca, incluindo regulamentações baseadas nas características inerentes, restaurando e protegendo habitats críticos, e melhoria da fiscalização. O cumprimento da legislação em áreas tão grandes e complexas como a Amazônia é difícil e caro. Esquemas de cogestão baseados em direitos de propriedade compartilhados podem ser particularmente eficazes, notadamente se a responsabilidade pela gestão ficar a cargo dos usuários e governos locais. A cogestão também pode fortalecer organizações locais, melhorar relações entre stakeholders, criar mecanismos para restrição de acesso (isto é, definir fronteiras), criar iniciativas (ex.: estratégias de comercialização) e aprimorar a aplicação das regulamentações⁷².

Restauração das planícies inundadas As planícies inundadas são ameaçadas por uma combinação de fatores de estresse, inclusive a perda de conectividade hidrológica e habitat, ambos com efeitos em cascata sobre o biota e impacto negativo sobre a produção e diversidade de peixes regional e local⁷³. Restaurar as planícies inundadas exige recuperar os regimes naturais das cheias e conectar as planícies inundadas com outros habitats críticos. Programas de restauração das planícies inundadas podem ser desenvolvidos através de parcerias colaborativas e envolvimento dos stakeholders⁷⁴. Programas de sucesso abordam problemas com regulamentações de atividade pecuária e engajam comunidades pesqueiras como os principais beneficiários de habitats restaurados.

Indicadores de sucesso Existe uma vasta gama de indicadores potenciais de sucesso^{75,76}, que variam em sua facilidade e escalabilidade. Por exemplo, plataformas abertas, como a Mapbiomas, permitem a avaliação de mudanças anuais nas florestas de toda a Amazônia com precisão razoável. Entretanto, mudanças específicas em nível de propriedade ou paisagem e bacia provavelmente exigirão avaliações mais personalizadas e imagens em alta resolução⁷⁷. Uma compreensão mais abrangente do sucesso da restauração exigirá avaliações baseadas em terra a fim de avaliar a prestação de serviços do ecossistema, biodiversidade terrestre e aquática e valores socioeconômicos⁷⁸. É muito mais difícil reunir esses indicadores em escala, sendo que os mesmos devem ser definidos de forma participativa com os stakeholders locais a fim de garantir que sejam eficazes em termos de custo, realistas em vista da expertise e dos recursos disponíveis e sustentável ao longo do tempo⁷⁹. Uma potencial solução é a nova tecnologia, como o app Ictio, criado para reunir informações padronizadas sobre a atividade pesqueira de usuários individuais em escala. Adicionalmente, deve-se desenvolver ferramentas práticas que utilizam critérios simples para avaliação de projetos de restauração mandatários no contexto de políticas públicas⁸⁰. Finalmente, existe a necessidade de aprender a partir de monitoramentos e avaliações; as informações precisam ser reunidas, analisadas e utilizadas para avaliar a eficácia da restauração. Essas análises também podem contribuir para modelar exercícios que explorem diferentes cenários de restauração ao longo do tempo, permitindo que os stakeholders tomem as decisões mais benéficas e eficazes em termos de custo e selecionem os programas de restauração que melhor se adaptem a seus objetivos.

Conclusões Existem muitas oportunidades para restauração que são pertinentes e tecnicamente viáveis nos diversos contextos amazônicos. Muitas abordagens de restauração têm alto custo e, dessa forma, enfrentam desafios significativos com escalabilidade espacial e temporal. Um especial desafio é a implementação efetiva e escalabilidade da restauração e remediação ativa, mas que permanece

essencial em situações em que as abordagens passivas são ineficazes. Finalmente, a restauração deve ser vista somente como último recurso. Para várias áreas da Amazônia, o objetivo principal deve ser evitar a necessidade de uma futura restauração por meio da conservação de florestas e corpos d'água intactos.

Referências

1. Seddon, N., Turner, B., Berry, P., Chausson, A. & Girardin, C. A. J. Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change* vol. 9 84–87 (2019).
2. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. & Maginnis, S. *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. (2016).
3. Chazdon, R. & Brancalion, P. Restoring forests as a means to many ends. *Science (80-.)*. 365, 24–25 (2019).
4. Lamb, D., Erskine, P. D. & Parrotta, J. A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science (80-.)*. 310, 1628–1632 (2005).
5. Kalamandeen, M. *et al.* Limited biomass recovery from gold mining in Amazonian forests. *J. Appl. Ecol.* 57, 1730–1740 (2020).
6. Barrios, E., Gudeta, W. S., Keith, S. & Sinclair, F. Agroforestry and Soil Health: Trees, Soil Biota and Ecosystem Services. in *Soil Ecology and Ecosystem Services* 315–330 (Oxford University Press, 2012).
7. Diringer, S. E. *et al.* River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environ. Sci. Process. Impacts* 17, 478–487 (2015).
8. Sonter, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 8, 1–7 (2017).
9. Chazdon, R. L. *et al.* The potential for species conservation in tropical secondary forests. *Conserv. Biol.* 23, 1406–1417 (2009).
10. Edwards, D. P., Massam, M. R., Haugaasen, T. & Gilroy, J. J. Tropical secondary forest regeneration conserves high levels of avian phylogenetic diversity. *Biol. Conserv.* 209, 432–439 (2017).
11. Rocha, R. *et al.* Secondary forest regeneration benefits old-growth specialist bats in a fragmented tropical landscape. *Sci. Rep.* 8, 1–9 (2018).
12. Ferreira, J. *et al.* Carbon-focused conservation may fail to protect the most biodiverse tropical forests. *Nat. Clim. Chang.* 8, 744–749 (2018).
13. Couic, E. *et al.* Mercury behaviour and C, N, and P biogeochemical cycles during ecological restoration processes of old mining sites in French Guiana. *Environ. Sci. Process. Impacts* 20, 657–672 (2018).
14. Chazdon, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Sci. Adv.* 2, e1501639 (2016).
15. Smith, M. N. *et al.* Empirical evidence for resilience of tropical forest photosynthesis in a warmer world. *Nat. Plants* 6, 1225–1230 (2020).

16. Griscom, H. P., Griscom, B. W. & Ashton, M. S. Forest Regeneration from Pasture in the Dry Tropics of Panama: Effects of Cattle, Exotic Grass, and Forested Riparia. *Restor. Ecol.* 17, 117–126 (2009).
17. Wassie, A., Sterck, F. J., Teketay, D. & Bongers, F. Effects of livestock exclusion on tree regeneration in church forests of Ethiopia. *For. Ecol. Manage.* 257, 765–772 (2009).
18. Ray, D., Nepstad, D. & Moutinho, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecol. Appl.* 15, 1664–1678 (2005).
19. Heinrich, V. H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nat. Commun.* 12, 1–11 (2021).
20. Lennox, G. D. *et al.* Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 24, 5680–5694 (2018).
21. Wang, Y. *et al.* Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon. *Nat. Sustain.* 3, 290–295 (2020).
22. da Cruz, D. C., Benayas, J. M. R., Ferreira, G. C., Santos, S. R. & Schwartz, G. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. *New For.* 52, 1–16 (2021).
23. Rodrigues, S. B. *et al.* Direct seeded and colonizing species guarantee successful early restoration of South Amazon forests. *For. Ecol. Manage.* 451, 117559 (2019).
24. Zahawi, R. A., Holl, K. D., Cole, R. J. & Reid, J. L. Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *J. Appl. Ecol.* 50, 88–96 (2013).
25. Bullock, E. L., Woodcock, C. E., Souza Jr, C. & Olofsson, P. Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon. *Glob. Chang. Biol.* 26, 2956–2969 (2020).
26. Nóbrega Spinola, J., Soares da Silva, M. J., Assis da Silva, J. R., Barlow, J. & Ferreira, J. A shared perspective on managing Amazonian sustainable-use reserves in an era of megafires. *J. Appl. Ecol.* 57, 2132–2138 (2020).
27. Brancalion, P. H. S. *et al.* Fake legal logging in the Brazilian Amazon. *Sci. Adv.* 4, eaat1192 (2018).
28. Garrett, R. D. *et al.* Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. *Glob. Environ. Chang.* 53, 233–243 (2018).
29. Strassburg, B. B. N. *et al.* When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Glob. Environ. Chang.* 28, 84–97 (2014).
30. Dias-Filho, M. B. Estratégias de recuperação de pastagens degradadas na Amazônia Brasileira. *Doc. / Embrapa Amaz. Orient.* Junho, 25 (2015).
31. Valentim, J. F. & Andrade, C. M. S. de. Perspectives of grass-legume pastures for sustainable animal production in the tropics. *Reun. Annu. DA Soc. Bras. Zootec.* 40, 142–154 (2004).
32. Zu Ermgassen, E. K. H. J. *et al.* Results from on-the-ground efforts to promote sustainable cattle ranching in the Brazilian Amazon. *Sustainability* 10, 1301 (2018).
33. Uphoff, N. *et al.* *Biological approaches to sustainable soil systems.* (CRC Press, 2006).
34. de Sousa, S. G. A., Wandelli, E. V., Garcia, L. C., Lourenco, J. N. de P. & Uguen, K. Sistemas agroflorestais para a agricultura familiar da Amazônia. in *ABC da agricultura Familiar* (Embrapa Amazônia Ocidental, 2012).
35. Valentim, J. F. Desafios e estratégias para recuperação de pastagens degradadas e intensificação da pecuária a pasto na Amazônia Legal. in *Embrapa Acre-Artigo em anais de congresso (ALICE)* (2016).
36. Bungenstab, D. J., Almeida, R. G. de, Laura, V. A., Balbino, L. C. & Ferreira, A. D. *ILPF: Inovação com interação de lavoura, pecuária e floresta.* Embrapa Acre (Embrapa).
37. Ranganathan, J., Waite, R., Searchinger, T. & Zions, J. Regenerative Agriculture: Good for Soil Health, but Limited Potential to Mitigate Climate Change. *World Resour. Inst.* (2020).
38. da Cruz, D. C., Benayas, J. M. R., Ferreira, G. C., Santos, S. R. & Schwartz, G. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. *New For.* 1–16 (2020).
39. Kato, O. R. *et al.* Projeto Tipitamba: transformando paisagens e compartilhando conhecimento na Amazônia. *Investimentos Transform. para um estilo Desenvolv. sustentável Estud. casos Gd. Impuls. (Big Push) para a sustentabilidade no Bras. Bras. CEPAL, 2020. LC/TS. 2020/37. p. 213-226* (2020).
40. Shimizu, M. K. *et al.* Agriculture without burning: restoration of altered areas with chop-and-mulch sequential agroforestry systems in the Amazon region. *Glob. Adv. Res. J. Agric. Sci.* 3, 415–422 (2014).
41. Denich, M., Vlek, P. L. G., de Abreu Sá, T. D., Vielhauer, K. & Lücke, W. A concept for the development of fire-free fallow management in the Eastern Amazon, Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 110, 43–58 (2005).
42. Nair, P. K. R. *An introduction to agroforestry.* (Springer Science & Business Media, 1993).
43. Jakovac, C. C., Peña-Claros, M., Mesquita, R. C. G., Bongers, F. & Kuyper, T. W. Swiddens under transition: consequences of agricultural intensification in the Amazon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218, 116–125 (2016).
44. Garrett, R. D. *et al.* Criteria for effective zero-deforestation commitments. *Glob. Environ. Chang.* 54, 135–147 (2019).
45. HLPE. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. *A Rep. by High Lev. Panel Expert. Food Secur. Nutr. Comm. World Food Secur.* 1–162 (2019).
46. Osis, R., Laurent, F. & Pocard-Chapuis, R. Spatial determinants and future land use scenarios of Paragominas municipality, an old agricultural frontier in Amazonia. *J. Land Use Sci.* 14, 258–279 (2019).
47. Pinillos, D. *et al.* Understanding Landscape Multifunctionality in a Post-forest Frontier: Supply and Demand of Ecosystem Services in Eastern Amazonia. *Front. Environ. Sci.* 7, (2020).
48. Nepstad, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science (80-)*. 344, 1118–1123 (2014).
49. Bendahan, A. B., Pocard-Chapuis, R., de Medeiros, R. D., de Lucena Costa, N. & Tourrand, J.-F. Management and labour in an integrated crop-livestock-forestry system in Roraima, Brazilian Amazonia. *Cah. Agric.* 27, 25005 (2018).
50. Bunn, S. E. Grand challenge for the future of freshwater ecosystems. *Front. Environ. Sci.* 4, 21 (2016).
51. Guedron, S. *et al.* Amazonian former gold mined soils as a source of methylmercury: Evidence from a small scale watershed in French Guiana. *Water Res.* 45, 2659–2669 (2011).

52. Diepens, N. J. & Koelmans, A. A. Accumulation of Plastic Debris and Associated Contaminants in Aquatic Food Webs. *Environ. Sci. Technol.* 52, 8510–8520 (2018).
53. Collard, F., Gasperi, J., Gabrielsen, G. W. & Tassin, B. Plastic Particle Ingestion by Wild Freshwater Fish: A Critical Review. *Environ. Sci. Technol.* 53, 12974–12988 (2019).
54. Lacerot, G., Lozoya, J. P. & Teixeira de Mello, F. Plásticos en ecosistemas acuáticos: presencia, transporte y efectos. *Ecosistemas* 29, (2020).
55. De-la-Torre, G. E. Microplastics: an emerging threat to food security and human health. *J. Food Sci. Technol.* 57, 1601–1608 (2020).
56. Giarrizzo, T. *et al.* Amazonia: the new frontier for plastic pollution. *Front. Ecol. Environ.* 17, 309–310 (2019).
57. Gerolin, C. R. *et al.* Microplastics in sediments from Amazon rivers, Brazil. *Sci. Total Environ.* 749, 141604 (2020).
58. Jia, L., Evans, S. & Linden, S. van der. Motivating actions to mitigate plastic pollution. *Nature Communications* vol. 10 1–3 (2019).
59. Abril Ortiz, A., Sucozhañay, D., Vanegas, P. & Martínez-Moscoso, A. A Regional Response to a Global Problem: Single Use Plastics Regulation in the Countries of the Pacific Alliance. *Sustainability* 12, 8093 (2020).
60. Alvarez-Risco, A., Rosen, M. A. & Del-Aguila-Arcentales, S. A New Regulation for Supporting a Circular Economy in the Plastic Industry: The Case of Peru (Short Communication). *J. Landsc. Ecol.* 13, 1–3 (2020).
61. Agostinho, A. A., Pelicice, F. M. & Gomes, L. C. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian J. Biol.* 68, 1119–1132 (2008).
62. Pompeu, P. dos S., Agostinho, A. A. & Pelicice, F. M. Existing and future challenges: the concept of successful fish passage in South America. *River Res. Appl.* 28, 504–512 (2012).
63. Pelicice, F. M., Pompeu, P. S. & Agostinho, A. A. Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of Neotropical migratory fish. *Fish.* 16, 697–715 (2015).
64. Bednarek, A. T. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal. *Environ. Manage.* 27, 803–814 (2001).
65. Bernhardt, E. S. *et al.* Synthesizing US river restoration efforts. (2005).
66. Maclin, E. & Sicchio, M. Dam removal success stories. in *Restoring Rivers Through Selective Removal of Dams That Don't Make Sense* (American Rivers, Friends of the Earth, & Trout Unlimited, 1999).
67. Kemp, P. S. & O'hanley, J. R. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fish. Manag. Ecol.* 17, 297–322 (2010).
68. O'Hanley, J. R., Pompeu, P. S., Louzada, M., Zambaldi, L. P. & Kemp, P. S. Optimizing hydropower dam location and removal in the São Francisco river basin, Brazil to balance hydropower and river biodiversity tradeoffs. *Landsc. Urban Plan.* 195, 103725 (2020).
69. Fearnside, P. M. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the pharaohs in Amazonia. *Environ. Manage.* 13, 401–423 (1989).
70. Heilpern, S. A. *et al.* Substitution of inland fisheries with aquaculture and chicken undermines human nutrition in the Peruvian Amazon. *Nat. Food* 2, 192–197 (2021).
71. Isaac, V. J. & De Almeida, M. C. El consumo de pescado en la Amazonia brasileña. *COPESCAL. Doc. Ocas.* I (2011).
72. Arantes, C. C. *et al.* Institutional effects on ecological outcomes of community-based management of fisheries in the Amazon. *Ambio* (2021).
73. Arantes, C. C. *et al.* Floodplain land cover affects biomass distribution of fish functional diversity in the Amazon River. *Sci. Rep.* 9, 1–13 (2019).
74. McGrath, D. G., Cardoso, A., Almeida, O. T. & Pezzuti, J. Constructing a policy and institutional framework for an ecosystem-based approach to managing the Lower Amazon floodplain. *Environ. Dev. Sustain.* 10, 677–695 (2008).
75. Ruiz-Jaen, M. C. & Mitchell Aide, T. Restoration success: how is it being measured? *Restor. Ecol.* 13, 569–577 (2005).
76. Stanturf, J. A. *et al.* *Forest landscape restoration as a key component of climate change mitigation and adaptation.* (International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Vienna, Austria, 2015).
77. de Almeida, D. R. A. *et al.* A new era in forest restoration monitoring. *Restor. Ecol.* 28, 8–11 (2020).
78. Wortley, L., Hero, J.-M. & Howes, M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restor. Ecol.* 21, 537–543 (2013).
79. Evans, K., Guariguata, M. R. & Brancalion, P. H. S. Participatory monitoring to connect local and global priorities for forest restoration. *Conserv. Biol.* 32, 525–534 (2018).
80. Chaves, R. B., Durigan, G., Brancalion, P. H. S. & Aronson, J. On the need of legal frameworks for assessing restoration projects success: new perspectives from São Paulo state (Brazil). *Restor. Ecol.* 23, 754–759 (2015).